

# Применение деформируемых зеркал в технологических СО<sub>2</sub>-лазерах. I. Зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности

О.Б.Выскубенко, П.И.Капустин, И.С.Колоколов, В.И.Масычев, А.Г.Сафронов

*Выполнен анализ одноканальных деформируемых зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности. Показаны преимущества биморфной деформируемой оптики по сравнению с зеркалами, имеющими в своей конструкции управляющий пьезопровод. Экспериментально установлено, что чувствительность управляемых биморфных зеркал нелинейно возрастает (до 30 %) при больших электрических напряжениях, а для динамических режимов работы этих зеркал характерно увеличение их температуры и емкости под воздействием переменного управляющего напряжения. Выполнено моделирование фокусирующей лазерной головки (фокусное расстояние 100–500 мм), содержащей деформируемое зеркало, а также эксперименты по управлению сфокусированным лазерным пучком.*

**Ключевые слова:** деформируемые зеркала с управляемой кривизной, технологические лазеры, управление положением и размером фокуса.

## 1. Одноканальные управляемые зеркала в лазерной технике

Накопленный опыт показывает, что на начальном этапе внедрения управляемых деформируемых зеркал в промышленные лазерные технологические комплексы целесообразно использовать простейшие элементы адаптивной оптики, в частности одноканальные деформируемые зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности. При этом уже сейчас в лазерных обрабатывающих технологиях можно назвать целый ряд актуальных задач, которые могут быть эффективно решены путем применения таких простейших управляемых зеркал.

В общем случае применяемые схемы расположения одноканальных деформируемых зеркал в промышленных лазерных системах можно разделить на две группы: схемы с размещением зеркал вне резонатора лазера и внутри него. Как правило, при внерезонаторном применении зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности в обрабатывающем лазерном комплексе решаются следующие задачи квазистатического или динамического характера:

1. Управление осевым положением фокуса (перетяжки) пучка, в том числе:

а) стабилизация осевого положения фокуса;

б) перемещение фокуса пучка по толщине обрабатываемой детали (управление глубиной и качеством лазерной резки и сварки, уменьшение времени лазерного сверления/перфорирования);

в) перемещение фокуса пучка в соответствии с профилем обрабатываемой детали (двумерная и трехмерная резка и сварка деталей сложной конфигурации, в частно-

сти деталей, содержащих фигурные профили и скругленные углы [1]).

2. Управление поперечным размером фокального пятна (перетяжки) пучка, например оптимизация (стабилизация) ширины лазерного реза (шва) в лазерных технологических комплексах с «летающей» оптикой [1].

3. Управление расходимостью лазерного пучка, например удержание излучения в пределах световых диаметров оптических элементов в лазерных технологических комплексах с крупногабаритными рабочими столами.

При управлении осевым положением фокуса лазерного пучка деформируемое зеркало располагают непосредственно перед фокусирующей головкой обрабатывающего комплекса, а при управлении поперечным размером фокального пятна и расходимостью лазерного пучка – вблизи источника лазерного излучения [2].

Применение эффективных зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности внутри лазерных резонаторов позволяет реализовать [3]:

– управление выходной мощностью лазеров вплоть до полного прекращения генерации за счет изменения геометрии резонатора;

– импульсно-периодические режимы генерации излучения в непрерывных лазерах (модулирование добротности резонатора), в том числе увеличение импульсной (пиковой) мощности излучения по сравнению с мощностью в непрерывном режиме.

Обычно зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности помещается в лазерный резонатор вместо концевого зеркала, однако при необходимости любое поворотное зеркало резонатора может быть заменено деформируемым [3] (с учетом компенсации возможного астигматизма). Кроме отмеченного применения одноканальных зеркал для управления резонатором они могут использоваться в нем и для решения традиционной задачи адаптивной оптики – компенсации тепловой линзы [4].

О.Б.Выскубенко, П.И.Капустин, И.С.Колоколов, В.И.Масычев, А.Г.Сафронов. НПО «Композит», Россия, 141070 Королев, Московская обл., тел.: (095) 513 22 22, факс: (095) 516 06 17

Поступила в редакцию 25 июня 2002 г.

Помимо жестких оптических требований внутрирезонаторное применение деформируемой оптики накладывает некоторые ограничения на массогабаритные характеристики одноканальных зеркал с управляемой кривизной: в идеальном варианте они должны соответствовать параметрам стандартной оптики. При этом условии замена стандартного зеркала резонатора управляемым не требует конструктивных изменений и переделок. Вероятно, данное ограничение является одной из причин, по которой одноканальные деформируемые зеркала с управляющим пьезоприводом [1], успешно применяющиеся в лазерных комплексах с «летающей» оптикой, не нашли своего применения внутри резонаторов.

С этой стороны весьма удобными оказываются биморфные одноканальные зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности [5], детальное рассмотрение которых выполнено в работе [6]. Габаритные размеры неохлаждаемой и охлаждаемой биморфной оптики, а также допустимые способы ее крепления позволяют легко размещать данные зеркала в любых механических узлах современной лазерной техники, включая вакуумно-плотную установку в резонаторах. Масса биморфных зеркал практически совпадает с массой типовой лазерной оптики. Вообще говоря, требование соответствия массогабаритных параметров деформируемой и стандартной оптики является важным в любом случае (не только для лазерных применений). Всегда проще и дешевле установить в системе новый элемент взамен старого, чем разрабатывать и изготавливать для него новый узел крепления, что нередко приводит к существенным конструктивным (и даже схемным) изменениям всей установки.

Для перечисленных выше применений одноканальных деформируемых зеркал в лазерной технике необходима высокая сферичность управляемых деформаций их отражающей поверхности (асферичность этих деформаций снижает качество лазерного пучка при управлении). Как правило, управляемые деформации одноканальных зеркал с пьезоприводом описываются гауссовыми функциями [7] и требуются специальные меры, чтобы сделать эти деформации сферическими. В то же время управляемые деформации биморфных зеркал являются почти строго сферическими (точнее параболическими), за исключением влияния краевых эффектов [8]. Следовательно, в этом отношении одноканальные биморфные зеркала, как минимум, не требуют специальной доработки своей конструкции.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований одноканальных биморфных зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности, предназначенных для работы в промышленных CO<sub>2</sub>-лазерах и системах на их основе, включая обрабатывающие комплексы. Основные характеристики неохлаждаемых и охлаждаемых зеркал этого типа были детально рассмотрены ранее в работах [5, 8]. Здесь приводятся результаты исследований, касающиеся практического использования охлаждаемых биморфных зеркал в лазерных системах.

## 2. Управляемые деформации и радиус кривизны одноканального охлаждаемого зеркала

Охлаждаемое биморфное зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности показано на рис.1. Ис-

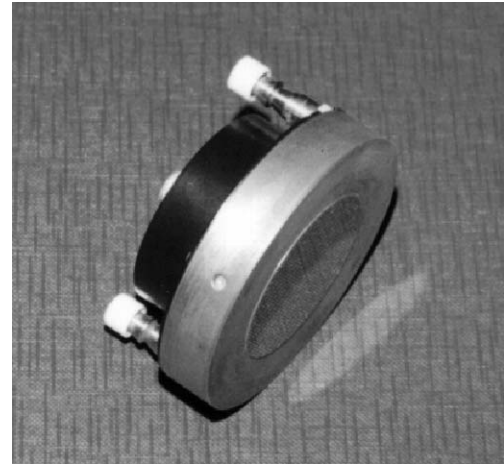


Рис.1. Охлаждаемое деформируемое зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности.

ходя из приведенного в [5] значения чувствительности ( $K = 46$  мкм/кВ) и учитывая небольшое ее различие для положительного ( $K_+ = 44$  мкм/кВ) и отрицательного ( $K_- = 49$  мкм/кВ) управляющего напряжения  $U$ , легко получить предельные деформации (стрелки прогиба)  $h$  исходно плоского зеркала для выпуклой ( $h_+$ ) и вогнутой ( $h_-$ ) отражающих поверхностей:

$$h_+ = -K_- U_- = 14.7 \text{ мкм}, \quad U_- = -300 \text{ В}, \quad (1)$$

$$h_- = -K_+ U_+ = -8.8 \text{ мкм}, \quad U_+ = 200 \text{ В}. \quad (2)$$

Используя значения стрелок прогиба  $h_+$  и  $h_-$ , соответствующие радиусы кривизны  $R_+$  и  $R_-$  поверхности зеркала при предельных управляющих напряжениях можно вычислить по формуле [9]

$$R = \frac{D^2 + 4h^2}{8h} \rightarrow \frac{D^2}{8h} \quad \text{при } D \gg h, \quad (3)$$

где  $D = 42$  мм – диаметр световой апертуры. Отсюда получаем, что предельный радиус кривизны  $R_+$  для выпуклой отражающей поверхности управляемого зеркала составляет 15.0 м, для вогнутой отражающей поверхности имеем  $R_- = -25.1$  м.

Хотя полученные результаты основываются на достоверных экспериментальных данных [5], необходимо сделать некоторые уточнения. Значения чувствительности охлаждаемого деформируемого зеркала получены в работе [5] в результате многократных интерферометрических измерений для управляющего напряжения, лежащего в диапазоне  $-100 \dots +100$  В (аналогичные измерения при больших напряжениях недостоверны). В свете этого приведенные выше значения  $h_+$ ,  $h_-$ ,  $R_+$  и  $R_-$ , строго говоря, надо считать результатом линейной экстраполяции зависимости  $h(U)$ , полученной в [5]. Линейность экстраполяции в данном случае обусловлена линейностью обратного пьезоэлектрического эффекта [10].

Экспериментальные значения управляемых деформаций (стрелок прогиба) зеркала при больших управляющих напряжениях можно определить другим способом, а именно путем прямых измерений радиуса кривизны отражающей поверхности. Такие измерения во всем рабочем диапазоне напряжений ( $-300 \dots +200$  В) были выполнены с помощью коллиматора, входящего в состав

оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. При всех напряжениях на деформируемом зеркале в коллиматоре наблюдалось хорошее качество изображения креста, что еще раз подтверждает высокую сферичность отражающей поверхности при управлении зеркалом. При напряжении  $U_- = -300$  В радиус кривизны зеркала  $R_+ = 10.6$  м (выпуклая форма), при напряжении  $U_+ = 210$  В радиус  $R_- = -19.6$  м (вогнутая форма). Видно, что экспериментальные значения  $R_+$  и  $R_-$  существенно отличаются от результатов линейной экстраполяции.

Используя экспериментальные значения радиусов кривизны  $R$  при различных управляющих напряжениях  $U$ , стрелки прогиба  $h$  при тех же  $U$  можно легко найти из формулы (3):

$$h = R - \left( R^2 - \frac{D^2}{4} \right)^{1/2} \rightarrow \frac{D^2}{8R} \text{ при } R \gg D. \quad (4)$$

Полученная таким образом зависимость  $h(U)$  в диапазоне управляющих напряжений  $-300 \dots +210$  В показана на рис.2 (кривая 1). При  $U_- = -300$  В стрелка прогиба отражающей поверхности зеркала  $h_+ = 20.7$  мкм (выпуклая форма), при  $U_+ = 210$  В имеем  $h_- = -11.3$  мкм (вогнутая форма). Для сравнения на рис.2 приведена аналогичная зависимость в диапазоне напряжений  $-100 \dots +100$  В из работы [5]. Средние наклоны кривых 1 и 2 различны, что означает повышение средней чувствительности деформируемого зеркала при больших управляющих напряжениях по сравнению с таковой для малых напряжений. В результате статистической обработки экспериментальных результатов найдено, что средняя чувствительность охлаждаемого зеркала с управляемой кривизной в диапазоне напряжений  $-300$  В ... 0 составляет  $72 \pm 6$  мкм/кВ, а в диапазоне  $0 \dots +200$  В она равна  $55 \pm 7$  мкм/кВ.

Более точный анализ управляемых деформаций пьезоэлектрических биморфных зеркал показывает, что их зависимость от электрического напряжения в общем случае имеет нелинейный характер. Для примера на рис.3 показана экспериментальная зависимость от управляющего напряжения нормированных деформаций отражающей поверхности для кварцевого биморфного зеркала (кривая 1); коэффициент нормировки – экспериментальное значение стрелки прогиба зеркала (0.44 мкм) при  $U_+ = 20$  В. Измерения выполнялись с использованием датчика Гартмана. Прямой 2 на рис.3 показана линейная зависимость стрелки прогиба от напряжения при чувствительности  $0.44 \text{ мкм}/20 \text{ В} = 22 \text{ мкм}/\text{кВ}$ . Видно, что реальные деформации зеркала имеют явную нелинейную

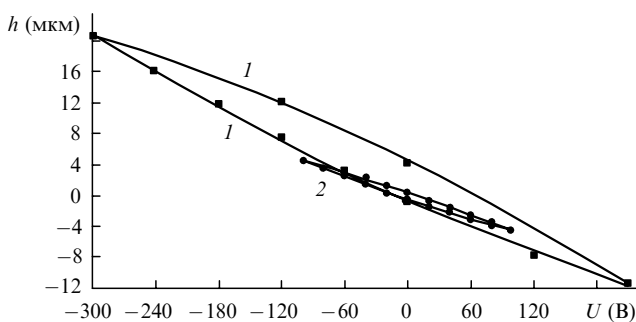


Рис.2. Зависимости стрелки прогиба  $h$  отражающей поверхности охлаждаемого деформируемого зеркала с управляемой кривизной от электрического напряжения  $U$  при его изменении в диапазонах  $-300 \dots +210$  В (1) и  $-100 \dots +100$  В (2).

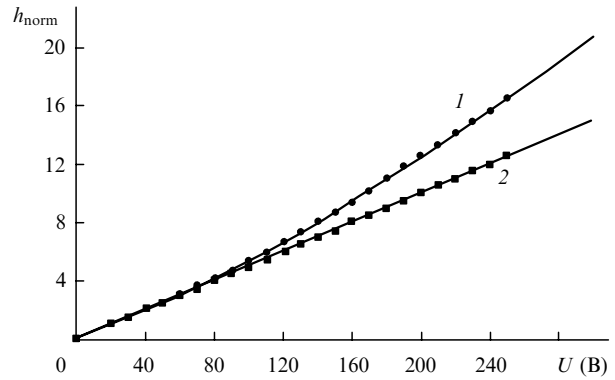


Рис.3. Зависимости нормированных стрелок прогиба отражающей поверхности  $h_{\text{norm}}$  от управляющего напряжения  $U$  для кварцевого биморфного зеркала (без учета гистерезиса): экспериментальные измерения (1) и линейная зависимость (2).

зависимость от  $U$  при больших напряжениях (линейный участок – до 80 В), что необходимо учитывать при определении максимальной управляемой кривизны отражающей поверхности зеркал этого типа.

С учетом рассмотренных экспериментальных результатов основные характеристики охлаждаемых деформируемых зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности представлены в табл.1 (на примере зеркала с плоской исходной формой).

Табл.1. Параметры одноканального деформируемого зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности.

Материал	молибден
Отражающее покрытие	медь
Защитное покрытие	SiO <sub>2</sub>
Диаметр световой апертуры	42 мм
Коэффициент зеркального отражения ( $\lambda = 10.6$ мкм)	не менее 98.5 %
Исходная форма оптической поверхности	плоская
Общая ошибка $N$ формы поверхности на полном световом диаметре ( $\lambda = 632.8$ нм) при 20 °С	не более $\lambda/2$
Местная ошибка $\Delta N$ формы поверхности ( $\lambda = 632.8$ нм)	не более $\lambda/8$
Управляющее напряжение	$-300 \dots +200$ В
Средняя чувствительность в диапазонах:	
$-100 \dots +100$ В	46 мкм/кВ
$-300 \text{ В} \dots 0$	72 мкм/кВ
$0 \dots +200$ В	55 мкм/кВ
Максимальная стрелка прогиба при напряжении:	
$-300$ В (выпуклая форма)	20.7 мкм
$+210$ В (вогнутая форма)	-11.3 мкм
Предельный радиус кривизны при напряжении:	
$-300$ В (выпуклая форма)	10.6 м
210 В (вогнутая форма)	-19.6 м
Емкость управляющего электрода	280 нФ
Гистерезис	не более 16 %
Частотный диапазон	0 – 1300 Гц
Хладагент	вода
Расход хладагента	0.5 – 1 л/мин
Мощность падающего излучения	не более 10 кВт
Масса	не более 0.35 кг
Рабочая температура	0 – 40 °С
Габаритные размеры:	
диаметр	70 мм
высота	38.6 мм
диаметр штуцеров системы охлаждения	7 мм

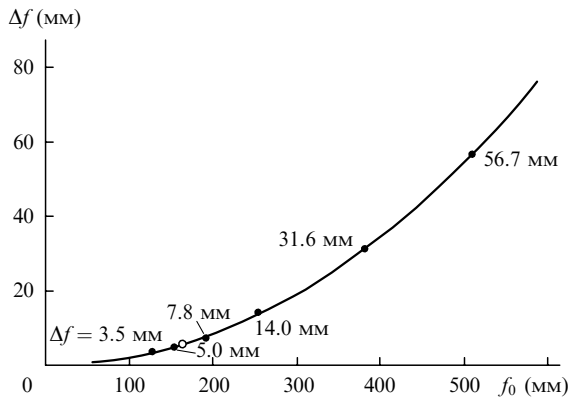


Рис.4. Диапазон изменения фокусного расстояния  $\Delta f$  фокусирующей лазерной головки с деформируемым зеркалом в зависимости от ее номинального фокусного расстояния  $f_0$ : результаты расчета (●) и экспериментальный результат (○) ( $f_0 = 160$  мм,  $\Delta L_0 = 6$  мм).

### 3. Управление фокусным расстоянием оптической системы

При использовании зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности в составе фокусирующей системы лазерного обрабатывающего комплекса появляется возможность управлять ее фокусным расстоянием, изменяя электрическое напряжение на деформируемом зеркале. Приведенные значения деформаций зеркал позволяют рассчитать диапазон изменения фокусного расстояния  $\Delta f$  для типовых фокусирующих лазерных систем. В качестве последних был использован модельный ряд двухзеркальных фокусирующих лазерных головок [11] с фиксированным фокусным расстоянием  $f_0 = 127, 152, 190, 254, 381$  и  $508$  мм. При расчетах выходное (фокусирующее) зеркало соответствовало штатному, а первое зеркало заменялось управляемым с эквивалентной исходной формой отражающей поверхности. Диапазон  $\Delta f$  вычислялся как длина отрезка на оптической оси между двумя положениями фокуса системы, соответствующими напряжениям на деформируемом зеркале  $200$  и  $-300$  В. Полученная зависимость  $\Delta f(f_0)$  показана на рис.4 и имеет квадратичный характер. В расчетах использовалась чувствительность зеркала при малых напряжениях (см. табл.1), так что реальные значения  $\Delta f$  должны быть выше.

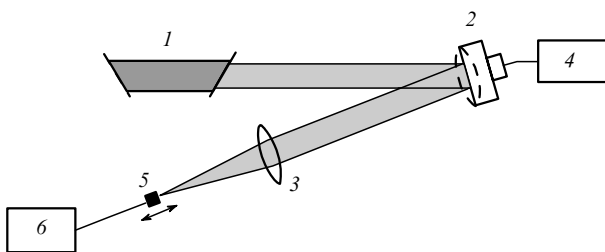


Рис.5. Схема измерений размера и положения перетяжки сфокусированного лазерного пучка:

1 – лазер ИЛГН-802 (длина волны  $10.6$  мкм, расходимость  $3$  мрад); 2 – охлаждаемое деформируемое зеркало с управляемой кривизной отражающей поверхности; 3 – фокусирующая линза из КСл (фокусное расстояние  $160$  мм); 4 – блок управления деформируемым зеркалом; 5 – приемник излучения прибора BeamScan на основе кристалла  $\text{LiNbO}_3$  (размер щели  $50$  мкм  $\times$   $9$  мм); 6 – электронный блок прибора BeamScan 1180.

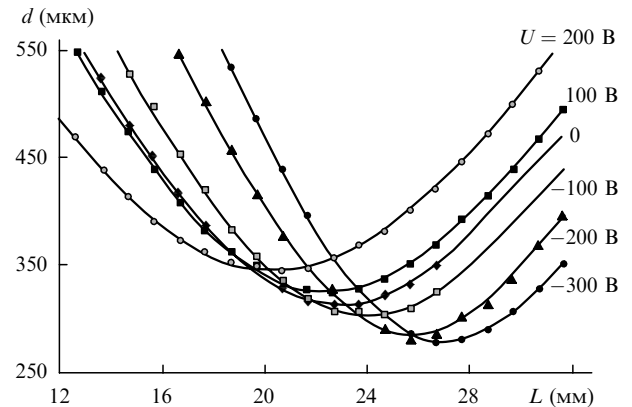


Рис.6. Эффективный диаметр  $d$  лазерного пучка (по уровню  $1/e^2$ ) вблизи его перетяжки в зависимости от координаты  $L$  (вдоль оптической оси) при различных управляющих напряжениях  $U$  на одноканальном деформируемом зеркале.

В случае лазерного пучка целесообразно рассматривать диапазон изменения осевого положения перетяжки  $\Delta L_0$  при управлении деформируемым зеркалом, входящим в состав фокусирующей лазерной головки. Очевидно, что расчетная зависимость  $\Delta L_0$  от номинального фокусного расстояния  $f_0$  лазерной головки будет незначительно отличаться от кривой на рис.4.

### 4. Управление осевым положением и поперечным размером перетяжки лазерного пучка

Экспериментальные измерения размера и положения перетяжки сфокусированного лазерного пучка при управлении им с помощью деформируемого зеркала были выполнены в оптической системе с номинальным фокусным расстоянием  $160$  мм; схема эксперимента приведена на рис.5. При измерениях сканировался профиль пучка вдоль оптической оси в районе его перетяжки с использованием прибора BeamScan, приемник излучения 5 которого размещался в стандартной микрометрической головке. Исходная форма отражающей поверхности управляемого зеркала 2 – плоская.

Результаты измерений показаны на рис.6; координата  $L$  возрастает вдоль оптической оси в направлении «от линзы» (см. рис.5). Таким образом, точка минимума каждой параболы на рис.6 характеризует положение ( $L_0$ ) и размер ( $d_0$ ) перетяжки сфокусированного лазерного пучка при некотором управляющем напряжении  $U$  на деформируемом зеркале 2.

Зависимость  $L_0(U)$  показана на рис.7. Видно, что она является линейной и что при изменении напряжения на деформируемом зеркале 2 от максимума до минимума диапазон  $\Delta L_0 = 6$  мм при  $f_0 = 160$  мм. Сравнивая полученное значение  $\Delta L_0$  с численными данными на рис.4, можно убедиться в их соответствии: экспериментальная точка хорошо ложится на расчетную кривую.

Зависимость размера перетяжки сфокусированного лазерного пучка от управляющего напряжения на деформируемом зеркале 2 показана на рис.8. Она также является линейной; диапазон изменения диаметра перетяжки составляет  $65$  мкм. Обе приведенные зависимости (рис.7, 8) следует считать линейными лишь в первом приближении, без учета влияния гистерезиса деформируемого зеркала (см. табл.1).

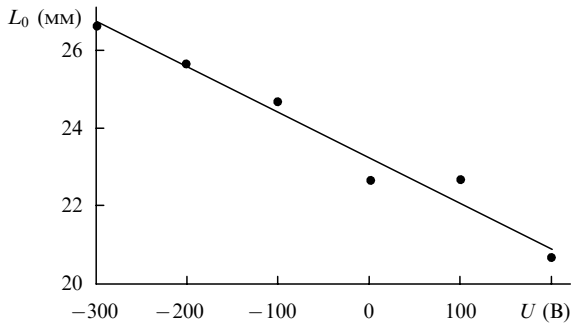


Рис.7. Положение перетяжки  $L_0$  лазерного пучка, сфокусированного управляемой оптической системой с номинальным фокусным расстоянием  $f_0 = 160$  мм, в зависимости от электрического напряжения  $U$  на деформируемом зеркале с управляемой кривизной отражающей поверхности (без учета гистерезиса).

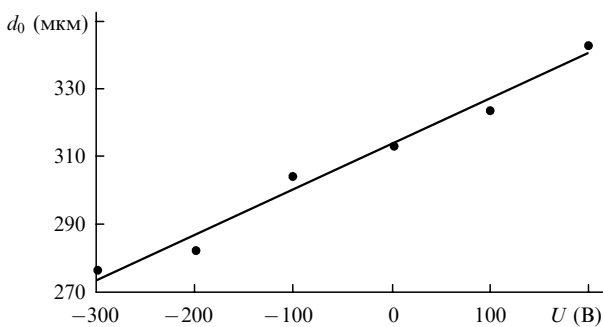


Рис.8. Диаметр перетяжки  $d_0$  лазерного пучка (по уровню  $1/e^2$ ), сфокусированного управляемой оптической системой с номинальным фокусным расстоянием  $f_0 = 160$  мм, в зависимости от электрического напряжения  $U$  на деформируемом зеркале с управляемой кривизной отражающей поверхности (без учета гистерезиса).

### 5. Работа управляемых зеркал в динамическом режиме

Рассматриваемые деформируемые зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности могут использоваться в лазерных системах в квазистатическом или динамическом режиме. В последнем случае управляющее напряжение на зеркале изменяется с некоторой частотой в пределах рабочего диапазона (см. табл.1).

Особенности работы управляемых биморфных зеркал в динамическом режиме связаны со свойствами пьезоэлектрической структуры, использованной в их конструкции. Эквивалентная электрическая схема такой структуры соответствует определенной емкости (см. табл.1). Под воздействием переменного электрического напряжения пьезокерамика разогревается, что приводит к увеличению температуры всего управляемого зеркала. На рис.9 представлены характерные временные зависимости температуры для одного из охлаждаемых деформируемых зеркал, полученные в процессе его частотных испытаний. Видно, что по мере разогрева зеркала его температура выходит на насыщение за время около полутора часов. Эта стационарная температура будет тем выше, чем больше начальная температура зеркала и его емкость, а также амплитуда и частота переменного управляющего напряжения. Таким образом, высокочастотное (более 50 Гц) и высоковольтное (более 200 В) управляющее напряжение может привести к разогреву пьезоэлектрического деформируемого зеркала до температуры,

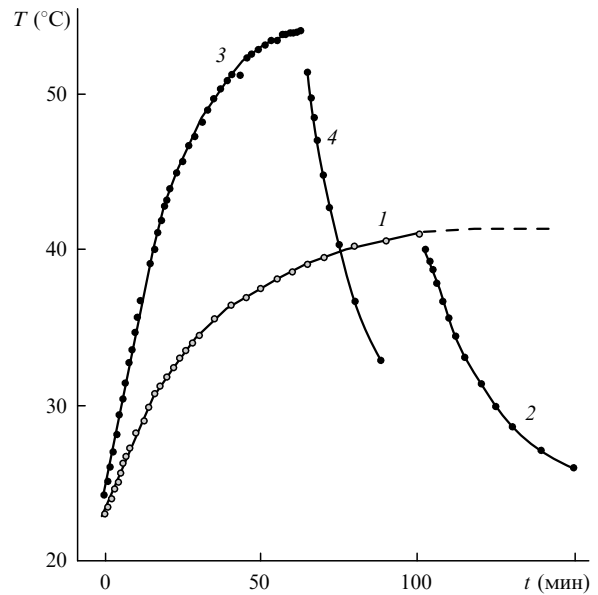


Рис.9. Изменение температуры  $T$  охлаждаемого деформируемого зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности в зависимости от времени  $t$  при частотных испытаниях. Система охлаждения зеркала отключена. Управляющее напряжение в виде меандра ( $\pm 180$  В) с частотой 50 Гц действует в интервале времени  $0 < t < 101$  мин (1, 2), а с частотой 100 Гц – в интервале  $0 < t < 61$  мин (3, 4).

превышающей его рабочую температуру (см. табл.1), и возникновению значительных термодформаций его отражающей поверхности.

Для охлаждаемых биморфных зеркал это обстоятельство не имеет принципиального значения, поскольку система охлаждения зеркала обеспечивает необходимый отвод тепла независимо от причины его возникновения (термовоздействие лазерного пучка или разогрев пьезокерамики переменным напряжением). По сути дела, система охлаждения зеркала обеспечивает его термостатирование и, тем самым, минимизацию термодформаций. Для неохлаждаемых пьезоэлектрических зеркал жесткие динамические режимы работы (т.е. высоковольтные и высокочастотные) могут потребовать внешнего принудительного охлаждения управляемого зеркала, например воздушного. При прочих равных условиях увеличение температуры  $\Delta T$  деформируемого пьезоэлектрического зеркала прямо пропорционально частоте  $\nu$  управляющего напряжения и квадрату его амплитуды  $U$  [12]:

$$\Delta T \propto P_{act} = 2\pi\nu C U^2 \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}, \quad (5)$$

где  $P_{act}$  – рассеиваемая активная мощность, обусловленная емкостью  $C$  управляемого зеркала;  $\tan \delta$  – тангенс диэлектрических потерь за счет емкости  $C$ .

Другой особенностью управляемых пьезоэлектрических зеркал является зависимость их емкости от температуры. По мере разогрева пьезокерамической структуры зеркала переменным управляющим напряжением его емкость возрастает, а при остывании – уменьшается. На рис.10 показано изменение емкости деформируемого зеркала с управляемой кривизной оптической поверхности при частотных испытаниях. Видно, что при изменении температуры зеркала от 50 до 25 °С его емкость линейно изменяется на ~15%. Температурный коэффициент емкости для охлаждаемых управляемых зеркал составляет 1.6 – 2.0 нФ/К. Для неохлаждаемых пьезо-

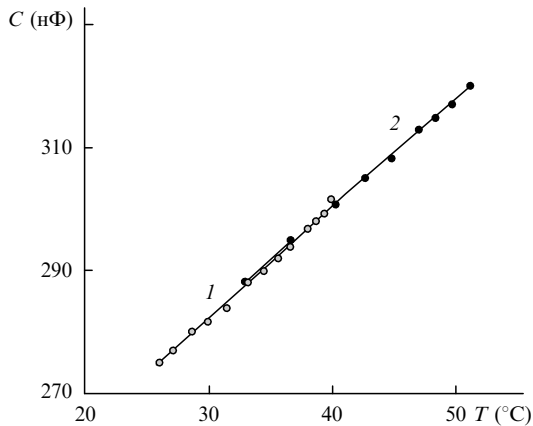


Рис.10. Зависимости емкости  $C$  охлаждаемого деформируемого зеркала с управляемой кривизной отражающей поверхности от температуры  $T$  при его остывании после воздействия в течение 101 (1) и 61 мин (2) управляющего напряжения в виде меандра ( $\pm 180$  В) с частотой 50 (1) и 100 Гц (2).

электрических зеркал подобное увеличение емкости при работе в динамическом режиме приводит к повышению требований к управляющей электронике. При использовании охлаждаемых биморфных зеркал в динамическом режиме никакого изменения емкости вообще не будет, т. к. система охлаждения обеспечивает термостатирование зеркала, включая его пьезоструктуру.

## 6. Заключение

Выполненный анализ одноканальных деформируемых зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности позволил систематизировать их применение в лазерной технике. Помимо традиционных для адаптивной оптики задач компенсации искажений рассмотренные деформируемые зеркала с успехом решают задачи управления параметрами оптических систем и лазерных пучков. Показаны преимущества биморфной деформируемой оптики по сравнению с зеркалами, имеющими в своей конструкции управляющий пьезопривод. К этим преимуществам относятся массогабаритные характеристики управляемых биморфных зеркал и «природная» сферичность управляемых деформаций их отражающей поверхности. При прочих равных условиях отмеченные достоинства одноканальных биморфных зеркал с управляемой кривизной отражающей поверхности имеют первостепенное значение с точки зрения промышленного внедрения адаптивной/управляемой оптики в лазерную технику.

Детальные экспериментальные исследования управляемых биморфных зеркал показали, что их чувствительность нелинейно возрастает (до 30 %) при больших электрических напряжениях  $U$ . При этом линейный участок зависимости деформаций от  $U$  составляет не более 1/3 от максимального диапазона управляющего напряжения. Для динамических режимов работы пьезоэлектрических деформируемых зеркал характерно увеличение их температуры и емкости под воздействием переменного управляющего напряжения. С этой точки зрения охлаждаемые зеркала с управляемой кривизной оптической поверхности более стабильны и надежны по сравнению с неохлаждаемыми.

При моделировании фокусирующей лазерной головки, содержащей деформируемое зеркало, получена квадратичная зависимость диапазона изменения фокусного расстояния  $\Delta f$  от номинального фокусного расстояния головки  $f_0$ . Для рассмотренных  $f_0 = 100 - 500$  мм относительный диапазон изменения фокусного расстояния  $\Delta f/f_0$  составляет 2.7 % – 11.2 %. С увеличением  $f_0$  он линейно возрастает.

В результате экспериментов по управлению сфокусированным лазерным пучком с помощью деформируемого зеркала получены линейные зависимости размера и положения его перетяжки от управляющего напряжения на зеркале. Эти зависимости полезны на практике, например при управлении лазерной резкой различных материалов. Относительный диапазон изменения положения перетяжки  $\Delta L_0/f_0$  составляет 3.8 %, что соответствует расчетной величине.

1. Bar K., Freisleben B., Kozlik C., Schmiel R. *Lasers in Eng.*, **4**, 233 (1995).
2. Schmiel R. *Photonics Spectra*, № 11, 127 (1999).
3. Сафронов А.Г. *Патент РФ по заявке № 2000125503 от 11. 10. 2000*.
4. Белуга И.Ш., Виневиц Б.С., Колосовская Л.А. *Оптика и спектроскопия*, **50**, 541 (1981).
5. Виневиц Б.С., Жариков В.М., Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, **25**, 377 (1998).
6. Kokorovski S.A. *J. Opt. Soc. Am.*, **69**, 181 (1979).
7. Тараненко В.Г., Шанин О.И. *Адаптивная оптика* (М.: Радио и связь, 1990, с. 41).
8. Сафронов А.Г. *Квантовая электроника*, **22**, 1113 (1995).
9. Краткий технический справочник. Под ред. В.А. Зиновьева (М.: Гос. изд-во тех. - теор. лит-ры, 1952, с. 50).
10. *Физическая энциклопедия*. Гл. ред. А.М. Прохоров (М.: Большая Российская энциклопедия, 1994, т. 4, с. 188).
11. *Opto Laser Europe*, № 6, 90 (1997).
12. *Справочник по электрическим конденсаторам*. Под ред. И.И. Четверткова, В.Ф. Смирнова (М.: Радио и связь, 1983, с. 19, 22, 23).